

**МОДЕЛИРОВАНИЕ ИМПУЛЬСНЫХ СТРУЙ ВИХРЕРАЗРЕШАЮЩИМИ МЕТОДАМИ****П. С. Чернышов***Балтийский государственный технический университет «ВОЕНМЕХ» имени Д.Ф. Устинова*

В связи с широким распространением численного моделирования в современной инженерной практике и важности его при решении широкого круга прикладных задач вычислительной газодинамики, а в особенности перспективных для развития современных технологий задач, необходимо изучение, разработка и выявление более совершенных методов моделирования. На сегодняшний день можно выделить 3 основных подхода в численном моделировании: подход в моделировании основанный на решении осредненных по Рейнольдсу уравнений Навье-Стокса (Reynolds Averaged Navier Stokes, RANS), метод моделирования крупных вихрей (Large Eddy Simulation, LES) и метод прямого численного моделирования (Direct Numerical Simulation, DNS). Далее рассмотрим подробнее каждый из методов.

RANS методы моделирования предполагают решение осредненных по Рейнольдсу уравнений Навье-Стокса с применением некоторых полуэмпирических замыкающих уравнений и функций, связывающих параметры течения и расстояние до стенок. Большой выбор соотношений при замыкании системы уравнений порождает огромное количество вариантов моделей RANS, которые могут применяться при численном моделировании. Самыми распространенными можно назвать двухпараметрические модели  $k-\varepsilon$  и  $k-\omega$ , которые основаны на решении уравнений переноса кинетической энергии турбулентности и скорости ее диссипации или удельной скорости диссипации. На данный момент использование RANS моделей наиболее распространено, с их помощью можно успешно решать некоторый ряд прикладных задач, при этом они не требуют для расчета высокие вычислительные мощности, однако в этом подходе моделируется весь спектр турбулентных пульсаций и не выявляется вихревая структура течения, которая зачастую оказывается крайне важна. Для подобных задач необходимо применение вихреразрешающих подходов численного моделирования.

Одним из таких вихреразрешающих подходов является метод DNS, который предполагает решение трехмерных и нестационарных уравнений Навье-Стокса, что позволяет получить любые мгновенные характеристики потока. Метод прямого численного моделирования используют для тестирования полуэмпирических моделей турбулентности, рассматривают как дополнительный источник некоторых, сложных для измерения, экспериментальных данных. Несмотря на свои очевидные достоинства, данный метод применяется редко, в основном для течений с простой геометрией и с небольшими числами Re, связано это прежде всего с крайне большими требуемыми вычислительными ресурсами.

В методе крупных вихрей решение полных уравнений Навье-Стокса происходит не на всех масштабах течения. Все поле течения разделяется на движение крупных и мелких вихрей. Мелкомасштабная турбулентность исключается из уравнений Навье-Стокса, при помощи операции фильтрации, которая осуществляется в результате интегрирования дифференциальных уравнений, представляющих законы сохранения, по контрольным объемам разностной сетки. В силу универсальности своих характеристик и изотропности, они хорошо поддаются моделированию и меньше влияют на поле течения. Крупные вихри рассчитываются, потому что они находятся под прямым воздействием граничных условий и несут в себе наибольшие рейнольдсовские напряжения. В данном методе также выдвигается предположение, что возможно аппроксимировать нелинейные взаимодействия между крупными и мелкими вихрями только по крупным вихрям с использованием специальных подсеточных моделей.

Благодаря исключению из уравнений Навье-Стокса мелкомасштабных движений моделирование методом крупных вихрей требует гораздо меньшие вычислительные ресурсы, что позволяет успешно решать намного более широкий круг задач, чем это возможно делать при помощи прямого численного моделирования, при условии ограниченности вычислительных ресурсов. Результаты моделирования методом LES содержат более богатую информацию, нежели результаты с использованием RANS моделей. Помимо характеристик среднего течения и распределения рейнольдсовских напряжений можно получить также спектральные характеристики (спектры пульсаций скорости и давления), двухточечные моменты (пространственные и пространственно-временные корреляции пульсаций скорости и давления), временные и пространственные масштабы турбулентности. Эти характеристики

могут быть использованы в важных прикладных задачах связанных с акустическими явлениями, расчетом химически реагирующих веществ, прочностных расчетах и многих других.

В данной работе в качестве объекта моделирования рассмотрена импульсная струя, истекающая из выхлопного сопла устройства газо-импульсной очистки. Данное устройство используется для очищения конвективных поверхностей теплообменных аппаратов от зольных отложений и отложений технологического уноса, на сегодняшний момент устройства газо-импульсной очистки получили широкое распространение в промышленности. Сущность работы данного устройства состоит в выхлопе продуктов сгорания в зону поверхностей теплообменных аппаратов через сопло в результате сгорания газо-воздушной смеси в специальной импульсной камере. Решающим фактором в механизме удаления отложений являются волны сжатия, образующиеся при возгорании горючей смеси и выходящие из сопла перед фронтом пламени.

Процесс выхода ударной волны из сопла, формирование струйного потока за срезом сопла в устройстве газо-импульсной очистки можно представить по картине формирования течения за срезом сопла в условиях запуска сопла в нестационарном режиме при разрыве диафрагмы, установленной в предсопловом объеме, что и было осуществлено в данном эксперименте, где нестационарный запуск был реализован на воздушном стенде, а разрыв диафрагмы осуществлялся при непрерывном повышении давления в предсопловом объеме. В результате эксперимента получены теневые фотографии, где показана картина течения из сопла в некоторые моменты времени. По представленным фотографиям можно наблюдать распространение пусковой ударной волны от среза сопла. Между волной торможения и пусковой ударной волны видна контактная поверхность, разделяющая истекающий из сопла газ от газа окружающего пространства, сжатого пусковой ударной волной. Начало формирования струи сопровождается образованием у кромки сопла вихревого кольца. Параметры истекающего из сопла потока в зоне разрежения между соплом и волной торможения согласуются с параметрами течения за боковой частью пусковой ударной волны с помощью тангенциальных разрывов и висячих скачков, которые замыкаются на волну торможения. С удалением волны торможения от сопла через некоторое время формируется волновая структура струи, характерная для первой «бочки» сверхзвуковой струи с диском Маха и позднее – с точкой регулярного отражения висячих скачков.

Для численного моделирования данного процесса была построена геометрия выходного сопла, предсоплового объема и выходной области. Задача была поставлена в двумерной осесимметричной постановке, благодаря чему расчетная область составляет всего 360 тысяч ячеек при размере ячеек сетки 0,1 мм. Для постановки задачи была выбрана модель совершенного газа и метод крупных вихрей, как наиболее подходящая для данного вида течения модель турбулентности. В качестве граничных условий было задано атмосферное давление на границе выходной области, в предсопловом объеме было создано избыточное давление, равное давлению разрыва диафрагмы, а вместо диафрагмы была создана полностью проницаемая для газа стенка.

Для визуализации скачков уплотнения и ударных волн, течение было рассмотрено через градиент давления и рассмотрено с реальной картиной течения (рисунок 1). На смоделированной картине течения хорошо заметно вихревое кольцо, пусковая ударная волна, висячий скачок уплотнения и диск Маха, которые также наблюдались в процессе реального истечения из сопла.



Рисунок 1 Сравнение результатов численного и физического эксперимента в некоторый момент времени.

На рисунке 2 показано развитие течения из сопла в некоторые моменты времени. На этом рисунке хорошо видно движение отходящей пусковой ударной волны, волна торможения, а также зарождение вихревого кольца.



Рисунок 2 Развитие течения импульсной струи во времени.

В результате численного моделирования вихреразрешающим методом была получена удовлетворительно согласовывающаяся с физическим экспериментом картина течения, а полученные в результате расчета характеристики могут быть использованы для изучения возможности улучшения конструкции устройства газо-импульсной очистки и для расчета различных акустических характеристик.

#### Список литературы

1. Волков К.Н. Емельянов В.Н. Моделирование крупных вихрей в расчетах турбулентных течений. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2008. – 368 с.